

Density and sound velocity measurements of liquid Fe-S at high pressure : Implications for the Earth's and the lunar cores

著者	西田 圭佑
number	55
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第2712号
URL	http://hdl.handle.net/10097/56797

氏名・(本籍)	にし だ けい すけ 西 田 圭 佑
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2 7 1 2 号
学位授与年月日	平 成 24 年 3 月 27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地学専攻
学位論文題目	Density and sound velocity measurements of liquid Fe-S at high pressure: Implications for the Earth's and the lunar cores (高圧下における鉄-硫黄系合金融体の密度・音速測定: 地球および月の核への応用)
論文審査委員	(主査) 教 授 大 谷 栄 治 教 授 塚 本 勝 男 准教授 鈴 木 昭 夫 教 授 吉 田 武 義 教 授 藤 巻 宏 和 教 授 石 渡 明 (東北アジア研究センター) 教 授 掛 川 武 教 授 趙 大 鵬 (地球物理学専攻)

論 文 目 次

Abstract I

Contents III

1. Introduction	1
2. Density measurements of liquid Fe-S at high pressure	3
2.1. Introduction	3
2.2. Experimental procedure	4
2.2.1. Quenching experiments	4
2.2.2. In-situ experiments	5
2.2.3. Composite density marker	6
2.3. Results	12
2.4. Discussion	22
3. Sound velocity measurements of liquid Fe-S at high pressure	24
3.1. Introduction	24
3.2. Experimental procedure	25
3.3. Results and discussion	31

4. Implications for the Lunar and the Earth's cores	46
4.1. Birch's law	46
4.2. The Earth's core	46
4.3. The lunar core	47
5. Conclusions	51
Acknowledgments	52
References	54

論文內容要旨

The density of liquid Fe-S was measured at 0.5 and 4 GPa, and 1650 °C using the sink-float method with a composite density marker. The densities of liquid Fe-S at 0.5 and 4 GPa decrease nonlinearly with increasing sulfur content and their trends are similar to each other. The excess molar volume (V_{ex}) at 0.5 GPa shows a value of -4×10^{-6} m³/mol at maximum, which is larger than that at 0.1 MPa and 4 GPa, because the real volume at 0.5 GPa is close to that at 4 GPa although the ideal volume at 0.5 GPa is in the middle between that at 0.1 MPa and 4 GPa. Since the liquid Fe-S shows a significant negative excess volume and behaves as non-ideal solution up to 4 GPa, the lunar outer core requires consideration of the non-ideal mixing in order to estimate the sulfur content in the core based on density.

P-wave velocity (V_p) of liquid Fe₈₄S₁₆, Fe₆₀S₄₀, and Fe₅₀S₅₀ were measured up to 5.4 GPa and 1550 °C using ultrasonic method combined with synchrotron X-ray technique. The derived V_p of liquid Fe-S shows very little change with temperature. V_p of liquid Fe-S decreases linearly with increasing S content at 2.5 GPa and 1300 °C. V_p of liquid Fe₆₀S₄₀ increases almost linearly from 3048 ± 13 m/s to 3845 ± 9 m/s with increasing pressure from 1.3 to 5.4 GPa, which can be approximated V_p [m/s] = $2664 + 205.4 \times P$ [GPa]. Although V_p of liquid Fe₆₀S₄₀ is slower than that of pure liquid Fe up to 5.4 GPa, the pressure derivative of V_p of liquid Fe₆₀S₄₀ is larger than that of liquid Fe. These results suggest that S is effective in decreasing V_p of liquid Fe up to at least 5.4 GPa, however it may be effective in increasing that over 7 GPa. V_p of the Earth's outer core is faster than that of pure liquid Fe, which can be accounted for by the positive effect of S on V_p at pressures higher than 7 GPa.

The liquid Fe₆₀S₄₀ was found to follow the Birch's law, i.e., linear P-wave velocity-density relation. The extrapolated V_p of liquid Fe₆₀S₄₀ is faster than those of Fe and PREM at the outer core density, indicating S affects to shift V_p of Fe toward the observed PREM value. Therefore, S is considered to be a possible light element of the Earth's outer core. Assuming the lunar core consists of liquid Fe-FeS outer core and solid Fe inner core, the expected V_p and density of the lunar outer core range 3840-4250 m/s and 5700-7260 g/m³, respectively.

論文審査の結果の要旨

西田圭祐君提出の論文は、高温高压下にある惑星や衛星の中心部の核を解明するために、核を構成していると考えられる Fe-S 系の液体の密度と地震波速度を測定し、天体内部における硫黄が存在する可能性を明らかにしたものである。この論文は 4 つの章からなる。第一章では、惑星および月を解明するために鉄・軽元素系の液体の密度および音速測定の重要性についての概論である。第二章では、地球核の軽元素の候補として硫黄の可能性を評価するために、Fe-S 液体の密度測定の詳細を論じた。測定には、独自に開発した浮沈法および X 線その場観察法と浮沈法を併用した測定、そして X 線吸収法など独自に開発した手法を用いて、Fe-S 液体の密度を約 4 GPa、1650°C までの圧力領域で測定した。この測定によって、Fe-S 液体の密度の硫黄量依存性を明らかにした。そして、この液体においては、4 GPa において理想性からずれ大きな負の混合体積変化を示すことを明らかにした。

第三章においては、Fe-S 液体の地震波縦波速度 V_p を超音波法と放射光 X 線を組み合わせて、5.4 GPa、1550°C までの条件で測定した。このような高压下における超音波法による液体の音速測定は、今回、西田圭祐君の技術開発によって、世界で初めて可能になった。この測定によって、 V_p は硫黄量の増加とともに減少し、圧力の増加とともに増加するのに対して、温度上昇によってはほとんど変化がないことが明らかになった。今回の結果によって、縦波速度 V_p と密度 ρ の関係は、 V_p [m/s] = $2664 + 205.4 \times P$ [GPa] で表すことが可能である。

第四章においては、以上の高温高压下での Fe-S 液体の密度と音速の測定にもとづいて、地球および月の核の組成について論じた。地球の外核の密度は純鉄の液体よりも小さいのに対して、縦波速度 V_p は大きい。今回の実験によって、金属鉄液体に硫黄の添加によって、高压では縦波速度が増加することが示唆され、硫黄は外核の軽元素の有力な候補であることが示唆された。最近、アポロ月探査機による月震観測データの再解析によって、月の中心部に核の存在が示唆されている。今回の測定結果を適用すると、月の核の縦波速度は Fe-S 系の液体の速度に一致し、月の核が Fe-S 液体からなっている可能性がある。

以上の研究は、西田圭祐君が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、西田圭祐君提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。